

09

Периодическая линзовая линия передач миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн

© Л.Б. Князьков, Н.В. Руженцев

Радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков
E-mail: rush@rian.kharkov.ua

Поступило в Редакцию 3 марта 2008 г.

Впервые сформулированы принципы построения линии передач на основе линз с близкой к единице величиной коэффициента преломления материала (периодической линзовой линии передач). Исследованы передаточные характеристики двух вариантов периодической линзовой линии передач в 3-х мм диапазоне длин волн. Продемонстрирована низкая величина затухания линии передач и одноименный режим распространения волны.

PACS: 07.57.-с, 42.82.Et, 84.40.-x

В квазиоптических устройствах миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн имеется возможность использовать линзы из диэлектрика для фокусировки гауссова пучка в процессе его распространения [1,2]. Потери на отражение в таких линзах пренебрежимо малы, благодаря близкой к единице величине коэффициента преломления материала. Это позволяет обеспечить низкие потери квазиоптических устройств (что особенно важно для малошумящих приемников) и значительно упростить их конструкцию и изготовление. В настоящей работе рассмотрены принципы построения периодической линзовой линии передач, продемонстрирован низкий коэффициент затухания и одноименный режим распространения волны на примере двух вариантов ее реализации.

В типичных линзовых линиях передач используются так называемые тонкие линзы, толщина которых в несколько раз меньше радиуса. Радиус кривизны фазового фронта фокусируемого гауссова пучка R_a в месте расположения такой линзы во много раз больше радиуса линзы r . С помощью простых геометрических построений, используя известные

выражения для параметров гауссова пучка [3], можно показать, что толщина тонкой линзы t достаточно точно равна:

$$t = \frac{r^2}{R_a(n-1)} = \frac{r^2 \lambda^2 a}{w_a^2 w_0^2 \pi^2 (n-1)}, \quad (1)$$

где λ — длина волны; a — половина расстояния между линзами; n — коэффициент преломления материала линзы; w_a, w_0 — радиусы гауссова пучка в месте расположения линзы и в перетяжке, соответственно.

Как следует из выражения (1), относительная длина пути в диэлектрике $\frac{t}{2a}$, определяющая потери на поглощение линзовой линии передач, не зависит от количества линз на единицу длины $\frac{1}{2a}$ для заданного уровня ограничения гауссова пучка апертурой линзы $\frac{t}{w_0}$. Наименьшие потери на поглощение при этом для заданного r обеспечиваются при условии $w_0 = w_a$ (наибольшее значение w_0), т.е. когда пучок практически не меняет своего поперечного размера при распространении (рис. 1, *a*). Однако количество линз на единицу длины при этом велико,

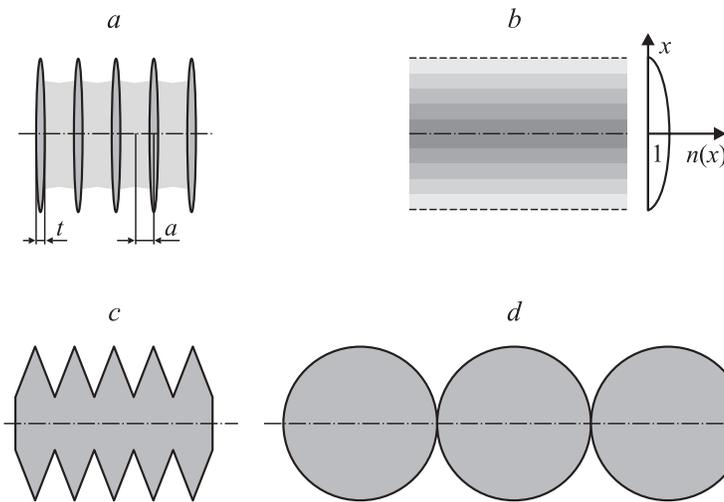


Рис. 1. Линзовая линия передач гауссова пучка постоянного радиуса (*a*), эквивалентная ей неоднородная диэлектрическая среда (*b*), пенидиэлектрическая линия передач на основе конических линз (*c*) и на основе шарообразных линз (*d*).

и линзовая линия передач имеет большие потери на отражение (кроме трудно реализуемого на практике варианта сверхтонких ($t \ll \frac{\lambda}{4n}$) линз).

С другой стороны, в представлении линз в качестве фазовых корректоров, линзовая линия передач гауссова пучка постоянного радиуса ($w_0 = w_a$) может рассматриваться как неоднородная диэлектрическая среда (рис. 1, *b*). Коэффициент преломления такой диэлектрической среды $n(x)$ уменьшается от оси (x -расстояние до оси) по параболическому закону (в силу $t \ll r$) и с учетом выражения (1) равен:

$$n(x) = 1 + \frac{(n-1)t}{2a} \left(1 - \left(\frac{x}{r} \right)^2 \right) = 1 + \frac{r^2 \lambda^2}{2w_0^4 \pi^2} \left(1 - \left(\frac{x}{r} \right)^2 \right). \quad (2)$$

Для характерных размеров линзовой линии передач $\frac{r}{\lambda} = 5-10$ и рациональном уровне ограничения пучка апертурой линзы $\frac{r}{w_0} \cong 2$ [3] наибольший (на оси) коэффициент преломления $n(0)$ диэлектрической среды равен 1.01–1.03 (следует из выражения (2)). Такие значения коэффициента преломления соответствуют пенодиэлектрикам (пенополистирол, пенополиэтилен и др.) предельно достижимой на практике низкой плотности. Поэтому возможность реализовать неоднородную диэлектрическую среду (рис. 1, *b*) ограничена технологическими трудностями изготовления пеноматериала сколь угодно низкой плотности. В то же время представляется возможным обеспечить условия распространения пучка в такой неоднородной диэлектрической среде, задав соответствующую (подобную линзовой) геометрию стержню из однородного пенодиэлектрика с коэффициентом преломления $n(0)$. Причем, в силу малости $n(0)$, можно не учитывать влияние отражений на передаточные характеристики и допустима относительная свобода в выборе геометрии линии передач.

Для демонстрации указанной возможности были изготовлены два варианта периодической линзовой линии передач и исследованы их передаточные характеристики в 3 мм диапазоне длин волн. Первая линия передач (рис. 1, *c*) состояла из двух двояковыпуклых линз конической формы и представляла собой стержень из пенополистирола 30 мм с кольцевыми углублениями треугольного сечения. Вторая линия передач (рис. 1, *d*) состояла из пенополистироловых шаров диаметром 30 мм, установленных на одной оси в непосредственной близости друг от друга. Коэффициент преломления пенополистирола обоих вариантов линии передач составлял 1.02.

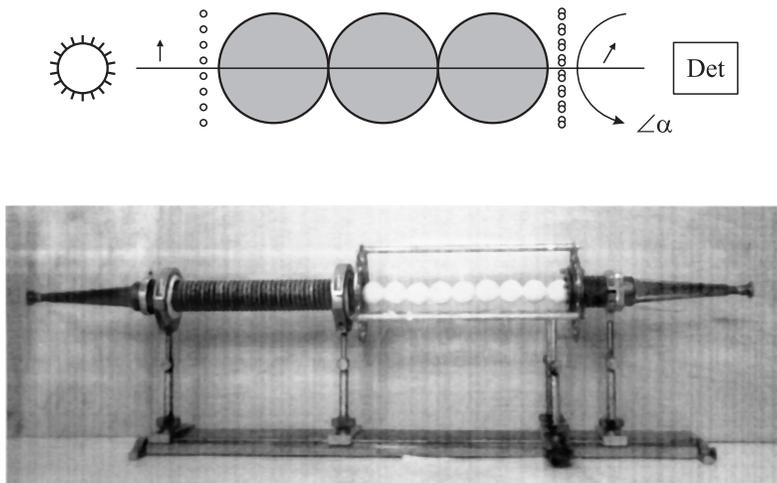


Рис. 2. Схема и фотография измерительной установки.

Исследования предаточных характеристик пенидиэлектрической линзовой линии передач проводились посредством поляризационного резонатора с регулируемой связью [4]. Поляризационный резонатор (рис. 2) представлял собой отрезок исследуемой линии передач длиной $l = 0.3 \text{ м}$, установленный между двумя одномерными проволочными решетками (поляризационными отражателями). Угол взаимного поворота (связь резонатора) проволочных решеток α устанавливался с помощью механизма поворота одной из них в пределах $0 \dots \pm 90^\circ$. В качестве облучателей использовались, согласованные по поляризации с решетками, волноводные переходы с отрезком волновода типа „канал в диэлектрике“. Последний служил для формирования волны EH_{11} , близкой по распределению поля гауссовому пучку, и представлял собой эбонитовую трубу с внутренним диаметром 30 мм и ребристой внешней поверхностью.

В приближении малых омических потерь на проволочных решетках коэффициент передачи по мощности поляризационного резонатора на частоте его резонанса равен [2,4]:

$$T(\alpha) = L \cos^2 \alpha \frac{(1 - \sqrt{L} + (\sqrt{L} - L) \cos^2 \alpha)^2}{(1 - L \cos^2 \alpha)^2} \quad (3)$$

и соответственно зависит от угла α и коэффициента затухания линии передач (L -затухание за один проход отрезка линии передач (по мощности, в разях)). Поэтому для измерения коэффициента затухания $c = \frac{10 \lg L}{l}$ (dB/m) линии передач достаточно измерить угол поворота проволочной решетки α (от нулевого положения), при котором уровень выходного сигнала (после детектора) $\frac{T(\alpha)}{T(0)}$ изменится в заданное число раз. Причем, для небольших углов ($\alpha < 20^\circ$) и $\frac{T(\alpha)}{T(0)} = \frac{1}{4}$ с достаточно высокой точностью удобно воспользоваться выражением:

$$c = \frac{10 \lg \cos^2 \alpha}{l}. \quad (4)$$

Частотные зависимости коэффициента затухания представлены на рис. 3. Для обоих вариантов периодической линии передач коэффициент затухания практически совпадал и составлял 0.7 ± 0.05 dB/m в середине частотного диапазона изменений (80–110 GHz) и увеличивался до 0.85 ± 0.05 dB/m к низкочастотному и высокочастотному

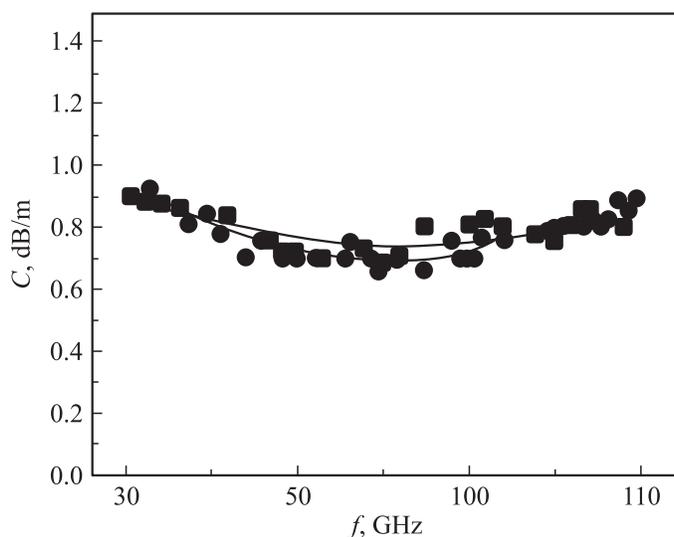


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента затухания периодической линии передач на основе конических линз (квадраты) и на основе сферообразных линз (круги).

краям. Такой характер частотной зависимости коэффициента затухания можно объяснить разной зависимостью радиационных потерь и потерь на поглощение от частоты. Искажения формы резонансной кривой и паразитных резонансов при измерениях посредством поляризационного резонатора не наблюдалось, что свидетельствует об одномодовом режиме распространения волны.

Таким образом, использование пенидиэлектриков в качестве материала линзовой линии передач гауссова пучка постоянного радиуса обеспечивает малый коэффициент затухания и одномодовый режим распространения волны. Эти достоинства, а также простота изготовления и использования позволяют рассматривать пенидиэлектрическую линзовую линию передач как наиболее перспективную для создания на ее основе квазиоптических систем mm и суб mm диапазонов длин волн.

Список литературы

- [1] *Kniazkov L.B., Ruzhentsev N.V.* // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2006. V. 27. N 2. P. 211-217.
- [2] *Князьков Л.Б., Руженцев Н.В.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 18. С. 1–7.
- [3] *Goldsmith P.F.* In Infrared and Millimeter Waves, K.J. Button, Ed. New York: Academic. 1982. V. 6. P. 277-343.
- [4] *Kniazkov L.B., Ruzhentsev N.V.* Proceeding of 7-th Int. Kharkov Symp. On Physics and Engineering of Microwaves, MM and sub-MM Waves and Workshop on Terahertz Technologies, June 25–30, Kharkov, Ukraine, 2007. P. 258–259.